

98 P 5866



⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift

⑩ DE 40 06 948 A 1

B3

⑤ Int. Cl.<sup>5</sup>:  
G 01 N 3/56  
G 01 M 17/00  
G 01 D 1/14  
G 01 D 1/18  
G 06 F 15/46

⑲ Aktenzeichen: P 40 06 948.6  
⑳ Anmeldetag: 6. 3. 90  
㉓ Offenlegungstag: 12. 9. 91

DE 40 06 948 A 1

⑦① Anmelder:  
Bayerische Motoren Werke AG, 8000 München, DE

⑦② Erfinder:  
Engelmohr, Franz, 8037 Olching, DE

⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht zu ziehende Druckschriften:

- DE 36 42 590 C2
- DE 34 37 661 C2
- DE 36 29 126 A1
- DE 35 35 932 A1
- DE 34 12 115 A1
- DE 33 25 550 A1
- DE 31 42 468 A1
- DE 31 41 016 A1
- DE 29 24 887 A1
- DE 27 30 914 A1
- DE 26 38 116 A1
- DE-OS 20 05 904
- DE-GM 19 57 061

KRONENBERG, Hartmut: Angewandte Elektronik im  
Automobil. In: Der Elektroniker 4/1983, S.50-53;

⑤④ Verfahren und Anordnung zum Überwachen des Verschleisses oder der Ermüdung eines zyklisch belasteten Bauteils

⑤⑦ Verfahren und Anordnung zum Überwachen des Verschleißes oder der Ermüdung eines zyklisch belasteten Bauteils. Um beim Test eines Fahrzeugs das Umrunden einer Teststrecke nur dann unterbrechen zu müssen, wenn wesentlicher Verschleiß vorliegt, werden on-line die Momentanwerte zweier am Bauteil auftretender Meßgrößen gemessen. Daraus werden Differenzsignale gebildet, die die statistische Verteilung der Differenz während eines Zyklus anfallender Momentanwerte beider Meßgrößen charakterisieren. Die Differenzsignale, die nach den ersten Umrundungen gewonnen werden, dienen als Bezugssignale für die weiteren Umrundungen und der Test braucht nur unterbrochen zu werden, wenn wesentliche Abweichungen zwischen den neuen Differenzsignalen und den gespeicherten Bezugssignalen vorliegen.

DE 40 06 948 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Überwachen des Verschleißes oder der Ermüdung eines im wesentlichen zyklisch belasteten Bauteils oder einer im wesentlichen zyklisch belasteten Baugruppe einer Maschine, insbesondere der Komponenten eines Kraftfahrzeugs beim mehrfachen Durchfahren einer Teststrecke oder eines Belastungszyklus auf dem Prüfstand. Die Erfindung betrifft ferner eine Anordnung zur Durchführung des Verfahrens.

Es sind bereits Verfahren zur Erfassung von Betriebsbeanspruchungen bekannt, bei denen Spannungen oder andere Belastungen, denen ein Bauteil ausgeliefert ist, gemessen und die anfallenden Meßwerte von Klassiergeräten nach verschiedenen Zählverfahren ausgewertet werden. Die klassierten Meßsignale geben dann ein Maß für die Belastung an. Aussagen über Beschädigung und Verschleiß des Bauteils können daraus nicht abgeleitet werden.

Um die Bildung von Rissen oder anderen Schädigungen festzustellen, sind Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung bekannt. Diese Verfahren beruhen auf der Erfassung und der Interpretation von Einzelereignissen, z. B. die Analyse des emittierten Schalls bei Ultraschallverfahren, und dienen der direkten und isolierten Untersuchung des Bauteils unter kontrollierten Bedingungen. Für derartige Einzeluntersuchungen ("Segmentalisierverfahren") sind in der Regel eigene Prüfstände erforderlich.

Fahrzeuge werden häufig auf Rennstrecken oder anderen Teststrecken endlicher Länge getestet. Die Teststrecke wird ständig erneut durchfahren, aus Sicherheitsgründen muß aber in bestimmten festgelegten Abständen das Fahrzeug im Prüfstand untersucht werden, um zumindest die kritischen Fahrzeugkomponenten auf Schäden oder Verschleiß zu überprüfen, selbst wenn aus der subjektiven Sicht der Testfahrer kein Indiz für eine Schädigung vorliegt. Dies führt zu Stillstandszeiten und Versuchskosten, die an sich unnötig sind.

Derartige erhöhte Kosten und Ausfallzeiten können aber vermieden werden, wenn der Verschleiß der betreffenden Bauteile bereits während der im wesentlichen zyklischen Belastung überwacht wird und die Maschine oder ihre Bauteile erst dann einer gezielten Untersuchung auf dem Prüfstand unterworfen werden, wenn Anzeichen eines wesentlichen Verschleißes vorliegen. Die üblichen Untersuchungsverfahren, wie sie z. B. auf dem Prüfstand durchgeführt werden, können aber z. B. bei einem Fahrzeug nicht ohne weiteres in das Fahrzeug verlegt und bei der Testfahrt durchgeführt werden. Hinzu kommt, daß die in einem Belastungszyklus nacheinander vorliegenden Belastungszustände nicht in jedem Zyklus genau gleich sind, vielmehr vom Fahrverhalten, den Temperatur- und Windverhältnissen und anderen Einflüssen abhängen und stochastisch auftreten, so daß eine "one-line"-Untersuchung des Bauteils während des Testbetriebes nicht ohne weiteres möglich ist.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Anordnung zum Überwachen des Verschleißes oder der Ermüdung eines Bauteils zu schaffen, das im wesentlichen zyklisch belastet ist.

Zur Lösung dieser Aufgabe sieht die Erfindung vor, die Momentanwerte zweier im Bauteil auftretender Meßgrößen fortlaufend zu erfassen und in Differenzsignale umzusetzen, die die statistische Verteilung der Differenz der während eines Zyklus anfallenden Mo-

mentanwerte beider Meßgrößen charakterisiert. Nach einem Belastungszyklus werden diese Differenzsignale mit gespeicherten Bezugssignalen verglichen, die die statistische Verteilung der Differenz beider Meßgrößen im praktisch neuwertigen Zustand des Bauteils charakterisieren. Nur bei wesentlicher Abweichung der Differenzsignale von den Bezugssignalen wird die zyklische Belastung vorzeitig abgebrochen.

Eine entsprechende Anordnung enthält daher zwei Meßgeber zur fortlaufenden Erfassung der beiden Meßgrößen und eine Recheneinrichtung mit mindestens einem Speicher, die die fortlaufend erfaßten Meßgrößen in Differenzsignale zur Charakterisierung der statistischen Verteilung der Differenz während eines Zyklus angefallener Momentanwerte beider Meßgrößen umsetzt. In einem zweiten Speicher sind entsprechende Bezugssignale gespeichert, die die statistische Verteilung der Differenz beider Meßgrößen im praktisch neuwertigen Zustand des Bauteils charakterisieren. Eine Anzeige- oder Auswerteeinrichtung vergleicht die Differenzsignale mit den Bezugssignalen. Der zyklische Betrieb des Bauteils braucht daher nur dann vorzeitig beendet zu werden, wenn der Vergleich beider Signale einen erhöhten Verschleiß andeutet.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

Anhand von 5 Figuren und einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird die Erfindung näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 die statistische Häufigkeitsverteilung für die Amplitude eines ersten Meßsignals, das die dem Bauteil im Belastungszyklus stochastisch eingeprägte Belastung wiedergibt,

Fig. 2 die statistische Häufigkeit der Amplitude eines zweiten Meßsignals, das eine Reaktion des Bauteils auf die eingeprägte Belastung wiedergibt,

Fig. 3 die Differenz der beiden Häufigkeitsverteilungen,

Fig. 4 die während eines Zyklus gesammelten und statistisch geordneten Differenzen der jeweils zum gleichen Zeitpunkt gemessenen Meßwerte beider Meßgrößen, und

Fig. 5 eine schematische Darstellung des erfindungsgemäßen Verfahrens und der dabei verwendeten Hardware.

Die Erfindung wird erläutert am Beispiel eines Fahrzeugs, bei dem z. B. auf eine Radmeßnabe während der einzelnen Belastungszyklen eine äußere Kraft (z. B. die Radaufstandskraft) eingeleitet wird. Diese äußere Kraft wird gemessen, wobei dieses Meßsignal ein Eingangssignal  $X_a$  darstellt, dessen Amplitude einen entsprechenden Wert  $X_{a_i}$  so oft annimmt, wie der entsprechende Belastungszustand im Lauf eines Belastungszyklus auftritt. Trotz des im wesentlichen zyklischen Betriebes auf der Teststrecke treten die Belastungszustände stochastisch auf. Fig. 1 zeigt die Häufigkeitsverteilung  $H(a)$ , mit der das Eingangssignal die entsprechenden Amplitudenwerte  $X_{a_i}$  annimmt.

Handelt es sich um ein Bauteil mit linearem Übertragungsverhalten, so ist die Reaktion des Bauteils, z. B. der Kraftfluß am Schräglenker, proportional zu der Belastung. Ein entsprechendes Antwortsignal  $X_e$  nimmt daher die entsprechenden Amplitudenwerte  $X_{e_i}$  genauso oft an und die Häufigkeitsverteilung  $H(e)$  ist praktisch deckungsgleich mit  $H(a)$ .

Diese Proportionalität von Eingangssignal und Ausgangssignal ist aber gestört, d. h. die Übertragungsfunktion ist nicht konstant, wenn das Bauteil ein Eigenver-

halten entwickelt. Ein nicht-harmonischer Kraftverlauf kann dann Eigenfrequenzen und Eigenformen anregen, die sich dem Antwortsignal  $X_e$  überlagern.

Das Bauteil wirkt dann wie ein Filter oder ein Verstärker.

Die eingeleiteten Kräfte werden nicht vollständig über das Bauteil übertragen und die zweite Meßgröße, die bei der durch die erste Meßgröße eingepprägten Belastung die resultierende Belastung des Bauteils erfaßt, erreicht nicht die vollen Amplitudenwerte. Es kann aber auch Resonanz angeregt werden, bei der die auftretenden Amplituden des zweiten Meßsignals die Amplituden des ersten Meßsignals übersteigen, die resultierende Belastung des Bauteils also über der eingepprägten Belastung liegt.

Ändert sich z. B. die "dynamische Steife" des Bauteils aufgrund von Schädigung oder Verschleiß, so ändert sich auch die Übertragungsfunktion und somit die Amplitudenverteilung des zweiten Meßsignals.

Wird also etwa ein Belastungszustand, bei dem das Meßsignal den positiven Wert  $X_{a'}$  oder den negativen Wert  $X_{a''}$  annimmt, in einem Belastungszyklus immer wieder derart durchlaufen, daß dabei eine besondere Dämpfung, eine Resonanz oder ein verzögerter Aufbau der zweiten Meßgröße auftritt, so tritt die entsprechende Amplitude  $X_{e'}$  bzw.  $X_{e''}$  entsprechend seltener auf, während andere Amplituden des Antwortsignals verstärkt oder geschwächt werden. Es kann also z. B. die Häufigkeitsverteilung  $H(e)$  der Fig. 2 auftreten.

Fig. 3 zeigt die Überlagerung der beiden Häufigkeitsverteilungen. Dabei tritt eine Differenzfläche auf, die im betrachteten Beispiel für kleine Amplitudenwerte  $X_a$  oder  $X_e$  positiv, für andere Amplitudenwerte aber negativ ist.

Werden also die während eines Zyklus auftretenden Momentanwerte der beiden Meßgrößen gesammelt und nach bestimmten Kriterien zu einem "Kollektiv" geordnet (z. B. nach der Größe ihrer Amplitudenwerte "klassiert"), so erhält man ein "Kollektiv" für die Eingangsgröße  $X_a$  und die Ausgangsgröße  $X_e$ . Diese Kollektive, insbesondere die Häufigkeitsverteilungen der Amplituden, können dann durch statistische Auswertung zu charakteristischen Parametern umgesetzt werden.

Z. B. kann ausgezählt werden, bei wieviel Messungen bezogen auf die Gesamtzahl der Messungen innerhalb eines Zyklus die momentanen Amplitudenwerte der beiden Meßgrößen innerhalb bestimmter Amplitudenbereiche liegen, die in Fig. 3 mit  $Dx_1$ ,  $Dx'_1$  und  $Dx''_1$  dargestellt sind. Es wird also der Flächeninhalt der Häufigkeitsverteilung über den entsprechenden Abschnitten der Amplitudenwerte gebildet. Als einen anderen Kollektivparameter könnte man z. B. die Maximalwerte der Häufigkeitsverteilungen und die dazu gehörenden Amplituden der jeweiligen Meßsignale bilden. Gibt man vorher einen gewissen Häufigkeitswert  $H(0)$  vor, so kann man nach denjenigen Amplituden und deren Häufigkeit fragen, die öfter als dieser vorgegebene Wert  $H(0)$  angenommen werden: in diesem Fall werden also die in Fig. 3 oberhalb der Geraden  $H(0)$  liegenden Kurventeile von  $H(a)$  und  $H(e)$  ausgewertet und deren Integrale oder zugehörigen Amplitudenwerte ermittelt. Schließlich kann vorteilhaft auch von der Differenz  $H(a) - H(e)$  der beiden Häufigkeitsverteilungen ausgegangen werden, deren Maximalwerte, Minimalwerte, Nulldurchgänge und/oder Umkehrpunkte charakteristische Parameter für die Differenz der beiden Kollektive darstellen können.

Sofern die Häufigkeitsverteilung der Fig. 1 von individuellen Parametern abhängt, kann die Differenz  $H(a) - H(e)$  vorteilhaft auf die Häufigkeitsverteilung  $H(a)$  normiert werden, so daß also die Größe  $1 - H(e)/H(a)$  gebildet wird, die die Abweichung der Übertragungsfunktion  $H(e)/H(a)$  charakterisiert.

Bisher war angenommen worden, daß zunächst die Momentanwerte der Amplituden beider Größen gesammelt und zu einem Kollektiv zusammengefaßt werden, um anschließend durch Differenzbildung die charakteristischen Differenzsignale zu bilden.

Man kann aber auch umgekehrt vorgehen und zuerst die Differenz beider Momentanwerte bilden, die Momentanwerte der Differenz während eines Zyklus sammeln und anschließend zur Bildung der charakteristischen Differenzsignale nach statistischen Methoden auswerten. Man erhält auf diese Weise ein Differenzkollektiv, für dessen Auswertung sich Klassiergeräte ebenso eignen wie für die bisher besprochene Auswertung des Eingangskollektivs und des Ausgangskollektivs.

Fig. 4 zeigt die Häufigkeitsverteilung  $H(a - e)$  der klassierten Differenzen  $X_a - X_e$ . Dabei sind nur solche Messungen ausgewertet, bei denen eine Differenz  $X_a - X_e$  ungleich 0 der momentanen Meßwerte aufgetreten ist. Auch hier können die Maxima der Häufigkeitsverteilung, die zu den Maxima gehörenden Differenzwerte oder die Flächeninhalte als geeignete Differenzsignale erfaßt werden.

Bei den ersten Belastungszyklen ist das Bauteil praktisch noch im neuwertigen Zustand. Werden in diesem Zustand die Meßdaten erfaßt, gesammelt und geordnet, so entsteht ein Abmessungskollektiv, dem entsprechende Differenzsignale als Bezugssignale zugeordnet sind. Diese Bezugssignale beschreiben den nicht-verschlissenen Zustand des Bauteils und werden gespeichert. Damit liegt für alle weiteren Zyklen ein Vergleichsmaßstab fest, mit dem die jeweiligen Differenzsignale verglichen werden, um eine Veränderung des Bauteils zu erfassen.

Die Erfindung schließt also auf Schädigung und Verschleiß, indem Momentanwerte von Messungen, die innerhalb des Zyklus eine Kette von Belastungszuständen erfassen, miteinander verknüpft werden. Damit wird zwar eine bestimmte Schädigung des Bauteils nicht direkt erkannt, jedoch kann indirekt auf eine gefährliche Veränderung des Bauteils geschlossen werden. Für diese Überwachung und Analyse des Bauteilzustandes werden aber nicht Absolutwerte eines Einzelsignals herangezogen, sondern Differenzbeträge aus Eingangs- und Antwortsignalen. Diese Merkmalsbewertung, die jeweils den Informationsgehalt der akkumulierten Signale des ganzen Zyklus verarbeitet, greift also nicht auf empirisch ermittelte Schädigungssummen zurück. Auch äußere Einflußfaktoren brauchen dabei weitgehend unberücksichtigt zu bleiben.

In Fig. 5 ist zunächst in einem ersten Programmschritt 1 dargestellt, daß Meßglieder  $1a$  und  $1e$  die beiden Meßsignale erfassen, mit denen die dem Bauteil von außen eingepprägte Meßgröße  $X_a$  und die Meßgröße  $X_e$  für die resultierende Belastung des Bauteils gemessen werden. Eine Rechenstufe  $1s$  bildet die charakteristischen Differenzsignale und kann dabei zwei handelsübliche Klassiergeräte  $1a'$  und  $1e'$  enthalten, in denen die jeweiligen Momentanwerte der Amplituden  $X_a(t)$  und  $X_e(t)$  bis zum Ende des jeweiligen Zyklus gespeichert und geordnet werden.

Wie bereits erwähnt wurde, kann es in manchem Fall vorteilhafter sein, erst die Differenz  $X_e(t) - X_a(t)$  in der

Rechenstufe zu bilden und die Momentanwerte dieser Differenz anschließend in einem Klassiergerät zu speichern und zu ordnen. Es kann auch vorteilhaft sein, die Momentanamplituden mehrerer Meßgrößen zu messen und auf die beschriebene Weise mit den Momentanwerten der Eingangsgröße zu verknüpfen. Auch bei der statistischen Auswertung können mehrere der beschriebenen Parameter miteinander kombiniert werden. Z. B. kann für die Differenzen  $X_a - X_e$  nicht nur deren Häufigkeitsverteilung selbst erfaßt werden, sondern auch die Häufigkeit, mit der die Klassen der Momentanamplitude  $X_a$  zu dieser Differenz beitragen. Je feiner die statistische Auswertung bei der Verknüpfung der einzelnen Kollektive vorgenommen wird, um so genauer wird der jeweilige Belastungszyklus beschrieben. Dadurch wächst der mathematische Aufwand für die statistische Auswertung, während gleichzeitig die stochastische Natur der Belastungszustände die Aussagefähigkeit des Vergleichs mit dem Bemessungskollektiv erschwert.

Die in Fig. 5 durch den Programmschritt 1 gewonnenen Differenzsignale werden nach einem der ersten Zyklen gespeichert. Es können auch durch Speicherung der Differenzsignale mehrerer Zyklen ermittelte mittlere Differenzsignale gebildet werden.

Nach etwa 2 bis 10 Belastungszyklen liegen somit Differenzsignale vor, die als Bemessungssignale dienen und in einem zweiten Programmschritt 2 in einem entsprechenden Speicher abgelegt werden.

Nach den weiteren Belastungszyklen werden die neu gewonnenen Differenzsignale mit den gespeicherten Bezugssignalen verglichen. Dieser Vergleich kann z. B. vorgenommen werden, indem die im Programmschritt 1 an Bord des Fahrzeugs gemessenen Differenzsignale jeweils beim Passieren der entsprechenden Boxen dem Wartungspersonal übergeben und dort ausgewertet werden. Es kann aber auch z. B. mittels eines einfachen Displays der jeweilige Satz charakteristischer Daten für die einzelnen Kollektive optisch angezeigt werden. Jedenfalls hängt es von dem Ergebnis des mechanisch ausgeführten oder vom Personal individuell vorgenommenen Vergleiches ab, ob die Testfahrt mit einem weiteren Belastungszyklus fortgesetzt oder durch eine genauere Untersuchung zur Schadensfrüherkennung unterbrochen wird.

Dadurch ist es möglich, einen großen Teil der bisher üblichen Aufenthalte und aufwendigen Untersuchungen am Prüfstand zu verringern und somit Zeit und Kosten von Testfahrten herabzusetzen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Überwachen des Verschleißes oder der Ermüdung eines im wesentlichen zyklisch belasteten Bauteils oder einer Baugruppe einer Maschine, insbesondere von Kraftfahrzeug-Komponenten beim mehrfachen Durchfahren einer Teststrecke, **dadurch gekennzeichnet**, daß

a) die Momentanwerte von zwei am Bauteil auftretenden Meßgrößen fortlaufend erfaßt und in Differenzsignale zur Charakterisierung der statistischen Verteilung der Differenz während eines Zyklus angefallener Momentanwerte beider Meßgrößen umgesetzt werden,

b) nach einem Belastungszyklus die Differenzsignale mit gespeicherten Bezugssignalen verglichen werden, die die statistische Verteilung der Differenz beider Meßgrößen im praktisch

neuwertigen Zustand des Bauteils charakterisieren, und

c) nur bei wesentlicher Abweichung der Differenzsignale von den Bezugssignalen die zyklische Belastung abgebrochen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das praktisch neuwertige Bauteil einem Belastungszyklus unterworfen wird, bei dem Differenzsignale zur Charakterisierung der statistischen Verteilung der Differenz während eines Zyklus angefallener Momentanwerte beider Meßgrößen gebildet werden, und daß diese Differenzsignale als Bezugssignale gespeichert werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß aus Momentanwerten der beiden Meßgrößen die Differenz gebildet wird und daß die während des Zyklus auftretenden Differenzen gesammelt, geordnet und zur Bildung der Differenzsignale statistisch ausgewertet werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die während des Zyklus auftretenden Momentanwerte der beiden Meßgrößen gesammelt und geordnet werden und daß die Differenzsignale durch statistische Auswertung der geordneten Momentanwerte gebildet werden.

5. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß zur statistischen Auswertung eine Klassierung vorgenommen wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß bei der statistischen Auswertung die Klassenhäufigkeiten ermittelt werden.

7. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß zur statistischen Auswertung die Amplituden von Klassen mit bestimmten Häufigkeiten ermittelt werden.

8. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß zur statistischen Auswertung die Differenzsignale aus den Amplituden der Klassen mit einem Häufigkeitsmaximum gebildet werden.

9. Anordnung zum Überwachen des Verschleißes oder der Ermüdung eines im wesentlichen zyklisch belasteten Bauteils einer Maschine, insbesondere der Kraftfahrzeug-Komponenten beim mehrfachen Durchfahren einer Teststrecke, gekennzeichnet durch zwei Meßgeber zur Erfassung der Momentanwerte von zwei am Bauteil auftretenden Meßgrößen, eine Recheneinrichtung mit mindestens einem ersten Speicher, um die während eines Zyklus angefallenen Momentanwerte in Differenzsignale zur Beschreibung der statistischen Verteilung der Differenz beider Momentanwerte zu bilden, einen zweiten Speicher für Bezugssignale, die die statistische Verteilung der Differenz beider Meßgrößen im praktisch neuwertigen Zustand des Bauteils charakterisieren, und eine Anzeige- oder Auswerteinrichtung für die Abweichung der Differenzsignale von den gespeicherten Bezugssignalen.

10. Anordnung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Recheneinrichtung mindestens ein Klassiergerät enthält.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

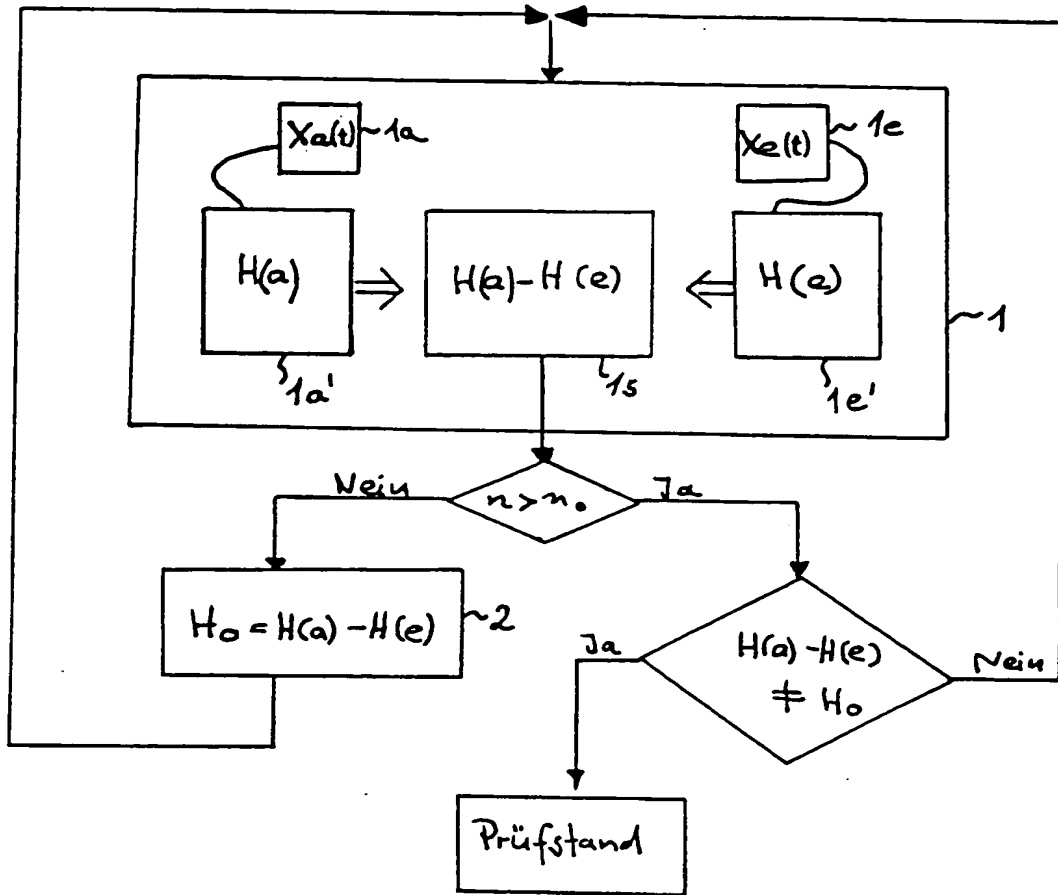


Fig. 5

